

УДК 621.791:625

Моделювання процесів нагрівання за допомогою концентратора електромагнітної енергії

Клименко В.О., к.т.н., доц. Цибульський Л.Ю.

Анотація.

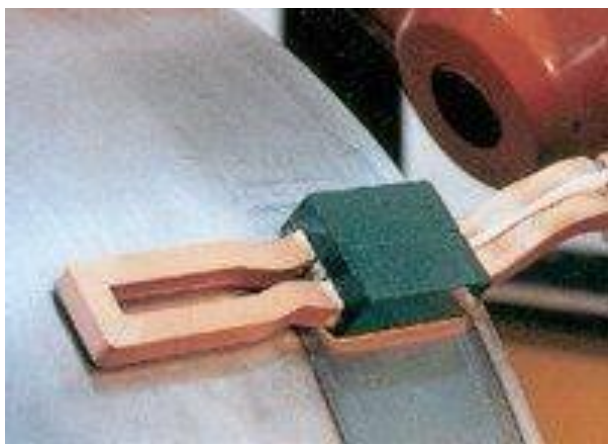
Індукційний нагрів (ІН) має широке застосування при поверхневій модифікації властивостей речовин. В останні роки поява металевих порошкового концентратора магнітного потоку дозволила збільшити можливості та покращити ефективність і керованість при індукційному нагріванні, тому аналітичне описання через моделювання та розрахунки стає необхідністю для проектування і оптимізації процесу. У статті розглянуто механізм перетворення енергії при індукційному нагріванні з концентратором магнітного потоку. Індукційний нагрів для сталі вивчається шляхом порівняння результатів кінцево-елементного моделювання (КЕМ) з експериментальними результатами. Кінцево-елементна модель вирішує пов'язану електромагнітно-термічну обчислювальну задачу, яка також включає розгляд нелінійних магнітних властивостей матеріалу в процесі нагрівання. Для перевірки імітації проводяться експерименти по індукційному нагріву для середньої частоти змінного струму для порівняння з результатами моделювання. Порівняння доводить

ефективність моделі КЕМ і розкриває внутрішню кореляцію магнітних і електричних полів в процесі.

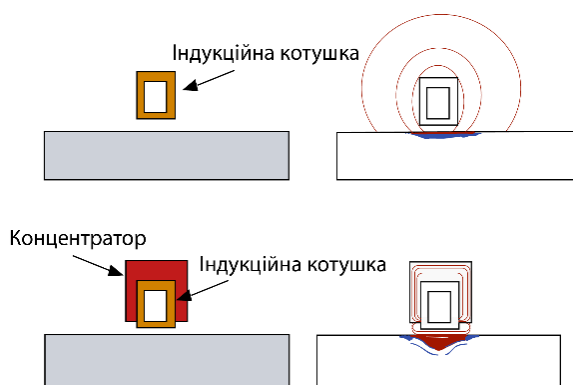
Вступ.

ІН набуває більш широкого застосування в різних промислових виробничих процесах, таких як загартування, пайка, відпуск, і випаровування речовин [1]. Проте доведено низьку ефективність нагріву і керованість, якщо в процесі поверхневого нагріву використовуються тільки відкриті котушки. Це відбувається тому, що поле магнітного потоку рівномірно випромінюється в просторі, де відбувається лише невелика частина магнітно-термічного перетворення і проникає в поверхню деталі [3]. Для стиснення магнітного потоку і більш високої ефективності нагріву, винайдені концентратори, які мають високу магнітну проникність і щільність потоку насичення, і додаються до котушок індукційного нагріву, як показано на рис.1. Концентратор виготовлений з феромагнітного металевих порошку, з'єднаного органічною сполучною речовиною для електричної ізоляції та зміцнення. Отже, він має більш високу проникність, ніж неізольована

котушка. Завдяки своїм особливим властивостям і конструкції, концентратори магнітного потоку локалізують магнітний потік в необхідній зоні, покращуючи розподіл тепла і запобігаючи утворенню небажаних вихревих струмів [3, 4]. Крім підвищення ефективності та оптимального розподілу потужності, концентратори магнітного потоку також знижують споживання котушки, тим самим значно знижуючи втрати потужності [4].



а)



б)

Рис. 1. Індуктор з концентратором магнітного потоку:
 а – зовнішній вигляд;
 б – використання концентратора

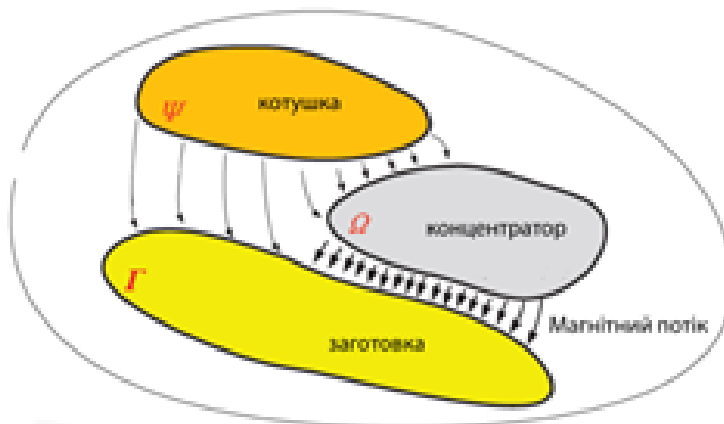
Однак використання концентратора робить управління процесом складнішим через наявність комбінованих електромагнітних полів. Крім того, у міру зміни магнітного потоку і температури в процесі, фізичні властивості як концентратора, так і матеріалу заготовки змінюються нелінійно [5, 6]. При спільному розгляді процесів неможливо отримати аналітичні рішення за класичними законами. Тому важливо проаналізувати пов'язані процеси за допомогою системного моделювання для проектування і оптимізації [7,8].

Мета роботи - дослідження механізму індукційного нагрівання на основі моделі кінцевих елементів індукційної системи з концентратором магнітного потоку. Модель і розрахунок процесу сприяють кращому розумінню механізму, що також є важливим для проектування і оптимізації процесів.

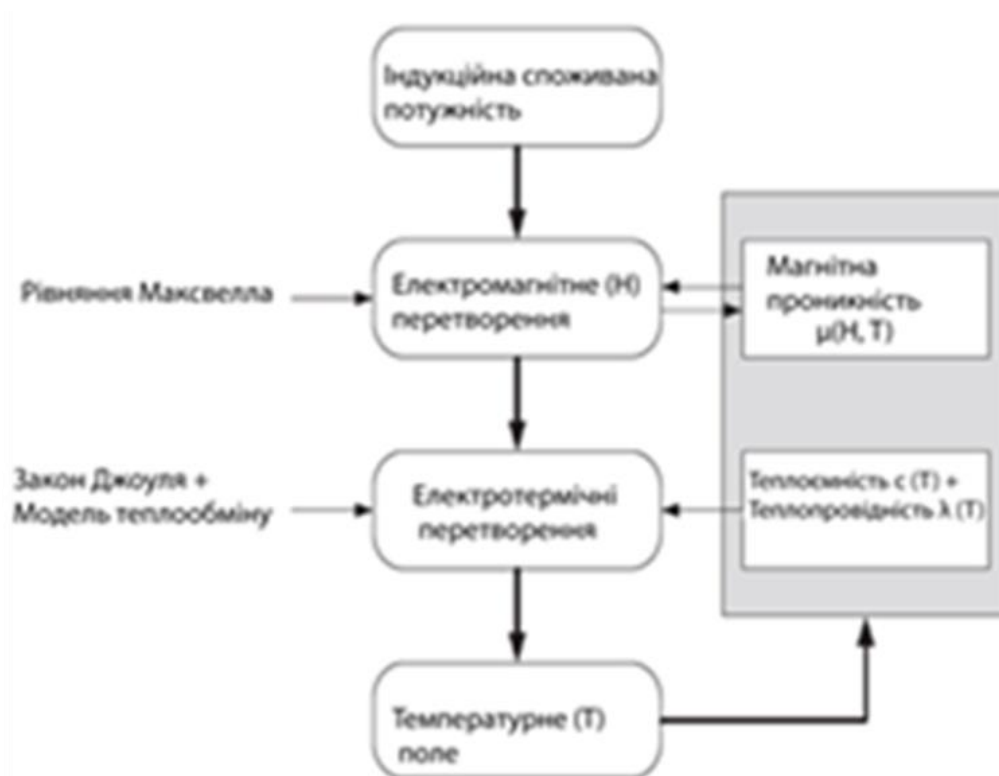
Механізм індукційного нагріву з допомогою електромагнітного концентратора

У порівнянні зі звичайним індукційним нагріванням, концентратор служить «лінзою», що підвищує проникнення магнітного потоку в оброблювану деталь, як показано на рис.2,а. Залежно від відносного положення концентратора і його магнітних властивостей, він здатний регулювати інтенсивність магнітного потоку в потрібній області, таким чином нагріваючи конкретне місце заготовки до заданої температури. Цей процес включає в себе електромагнітне нагрівання

(рис.2,б). Нелінійні властивості змінюються в залежності від матеріалу (магнітна проникність, інтенсивності магнітного потоку і теплоємність і теплопровідність), які температури ускладнюють задачу.



а)



б)

Рис. 2. Перетворення енергії при індукційному нагріванні з концентратором:

- а - принцип роботи концентратора;
- б - процеси перетворення енергії

Магнітодинамічні явища регулюється рівняннями Максвелла (рівняння 1-4), де E і H - напруженість електричного (В/м) і магнітного (А/м) полів, які генерується змінним струмом [2]. При цьому визначаються співвідношення між величинами поля (рівняння 5-7) [2]. Напруженість H залежить від сили струму I , його частоти f , проникності концентратора, а також форми і положення концентратора.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

(з закону Ампера)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

(з закону Фарадея)

$$\nabla \times D = \rho; \quad (3)$$

(з закону Гауса)

$$\nabla \times B = 0; \quad (4)$$

(з закону Гауса)

$$D = \varepsilon E \quad (5)$$

$$B = \mu H \quad (6)$$

$$J = \sigma E \quad (7)$$

де H – напруженість магнітного поля, А / м; J – щільність струму, А / м²; D – щільність електричного потоку або електрична індукція, Кл / м²; t – час, с; E – напруженість електричного поля, В / м; B – щільність магнітного потоку або магнітна індукція, Тл, ρ – щільність електричного заряду Кл/ м³; ε – відносна діелектрична проникність, μ – відносна магнітна проникність, σ – питома електропровідність, мкСм/см.

Включивши вищевказані конститутивні співвідношення в рівняння Максвелла і після розрахунка, будуть отримані два головних рівняння:

$$\nabla^2 E - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial J}{\partial t} + \nabla \frac{\rho}{\varepsilon}; \quad (8)$$

$$\nabla^2 H - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = -\nabla \times J \quad (9)$$

Для розрахунку E і H зручно ввести в магнітний вектор потенціал A і електричний скалярний потенціал φ .

$$B = \nabla \times A; \quad (10)$$

$$E = -\nabla \varphi - \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (11)$$

Підставляючи рівняння (10) і (11) в рівняннях (8) і (9), отримаємо:

$$\nabla^2 A - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = \mu J; \quad (12)$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}. \quad (13)$$

Знаходимо змінні A і φ , підставляємо їх до рівнянь (10) і (11) і знаходимо остаточні рішення змінних E і H .

Теплообмін в металевих матеріалах описується рівнянням Фур'є [2]:

$$c p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\lambda \nabla T) = Q_v, \quad (14)$$

де, T – температура в металевій заготовці, c – питома теплоємність, p – щільність металевих матеріалів, λ – теплопровідність металу, Q_v – щільність генерованого тепла, індукована вихровими струмами в одиницю часу в одиничному об'ємі. Щільність генерованого тепла визначається при рішенні електромагнітної задачі.

Граничні умови при термічному аналізі можна описати виразом:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T - T_a) - C_s(T^4 - T_a^4), \quad (15)$$

де, $\partial T / \partial n$ – градієнт температури в напрямку, перпендикулярному поверхні деталі в даній точці, λ – теплопровідність деталі, α – температуропровідність, C_s – коефіцієнт теплових втрат на

випромінювання, n – нормаль до поверхні деталі.

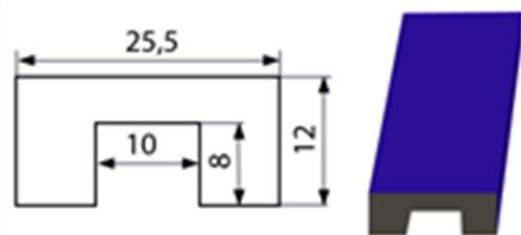
Кінцево-елементне моделювання

Завдяки потужним обчислювальним можливостям у вирішенні пов'язаних фізичних задач, метод кінцевих елементів стає все більш широко застосовуваним в інженерних областях [9-15]. Створення моделі МКЕ включає наступні етапи, включаючи моделювання геометрії, специфікацію властивостей матеріалу, визначення граничних умов, сітку та розрахунок результатів. У цій роботі МКЕ програмне забезпечення FLUX2D використовується для розрахунку розподілу щільності потужності і температурного поля для процесу індукційного нагріву.

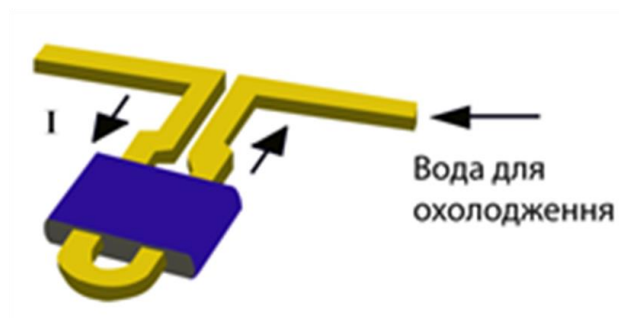
Спочатку моделюється деталі для поверхневого індукційного нагріву, як показано на рис.3. Індукційна котушка показана на рис.3,а. Котушка виконана з прямокутної мідної труби. Концентратор має прямокутну канавку і накладається на котушку (рис.3,б і рис.3,в).



а)



б)



в)

Рис. 3. Геометрія індуктора:

- а - котушка;
 б - концентратор (одиниці - мм);
 в - індуктор

За матеріал деталі оберемо м'яку вуглецеву сталь за стандартом AISI 1045, її хімічний склад наведено в табл.1. Деталь має довжину, ширину, висоту – 150, 65, 25 мм, відповідно.

Таблиця 1 - Хімічний склад сталі за стандартом AISI 1045

Назва	мас.,%
C	0,46
Si	0,24
Mn	0,64
P	0,012
S	0,028

Ni	0,01
Cr	0,01
Cu	0,01

Область моделювання показана на рис.4. Система оточена повітрям. Розподіл розрахункової сітки показано на рис.4: на рис.4,а – вся область дослідження, на рис 4, б – збільшена частина індуктора, концентратора і деталі..

При моделюванні коефіцієнт теплообміну α і коефіцієнт випромінювання C_s задавалися як $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ і $C_s = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

В процесі індукційного нагрівання змінюються як магнітні, так і теплові властивості матеріалу деталі. Магнітна проникність μ характеризується магнітною поляризацією M матеріалу, на яку впливають як напруженість магнітного поля, так і температура. Кількісне визначення μ здійснюється шляхом вимірювання магнітної поляризації M і напруженості магнітного поля H при різних температурних умовах. Рівняння (16) задає зв'язок проникності μ і поляризації M .

$$B = \mu_0 \mu H = \mu_0 H + \mu_0 M, \quad (16)$$

де μ_0 - проникність повітря, яка дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (Гн/м)}$.

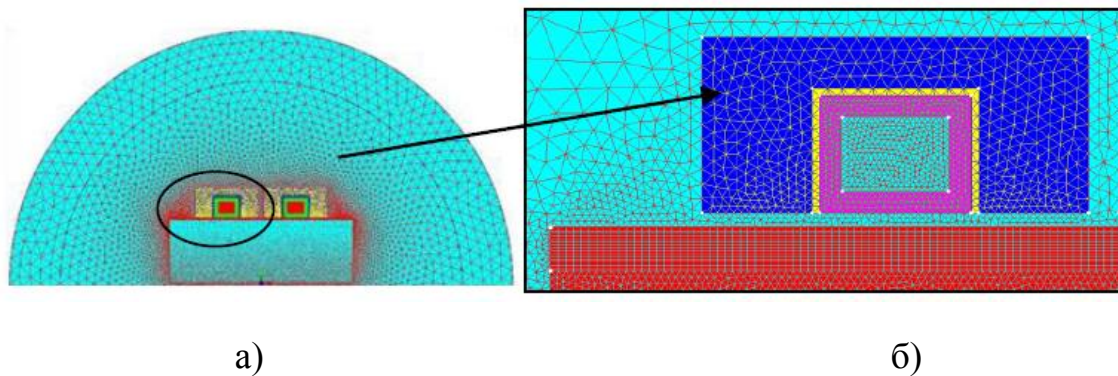


Рис. 4. Геометрична модель і кінцево-елементна сітка:
 а - сітка МКЕ;
 б - збільшений фрагмент МКЕ.

Криві М-Н матеріалу деталі на рис.5 показують нелінійність і майже відсутність гістерезисної петлі, що вказує на те, що деталь є магнитом'яким матеріалом з невеликими втратами на гістерезис при нагріванні. Коли температура деталі збільшується, магнітна проникність різко знижується, поки не впаде до 1 при температурі Кюрі. Крім того, напруженість магнітного поля також впливає на магнітну проникність заготовки.

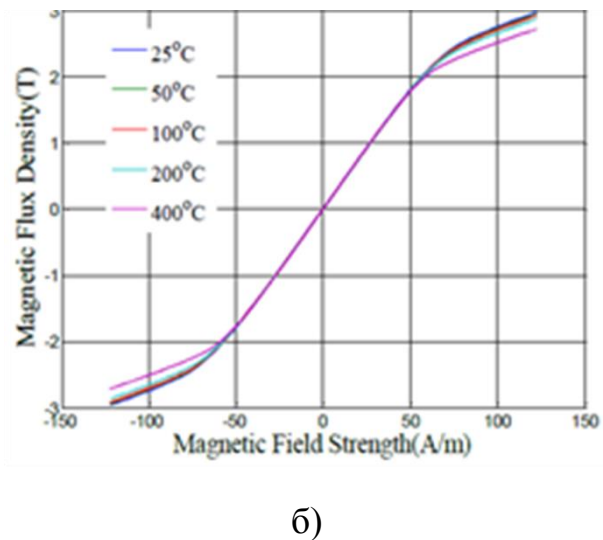
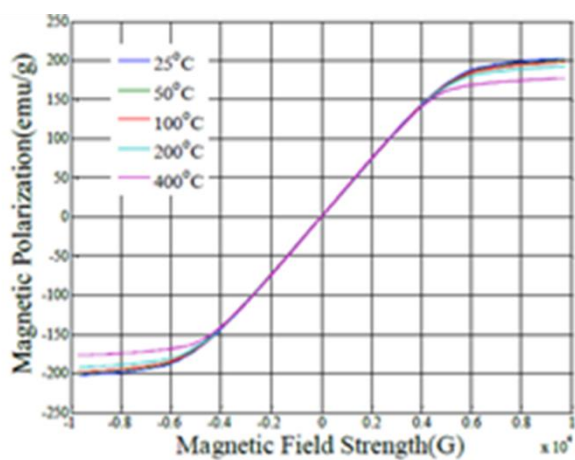


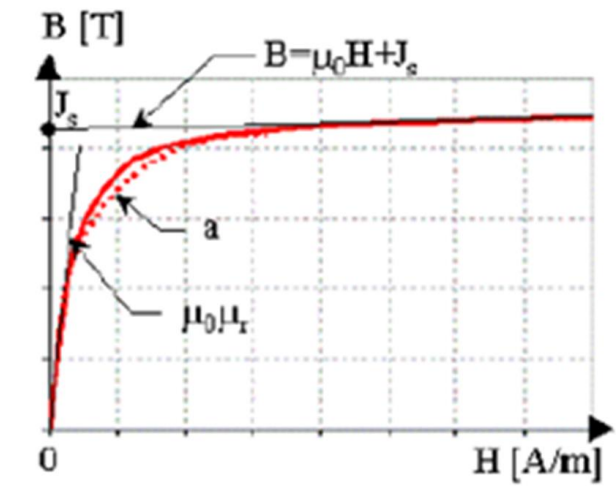
Рис. 5. Емпірична крива М-Н і трансформуюча крива В-Н сталі 1045:
 а - Крива М-Н;
 б - Крива В-Н



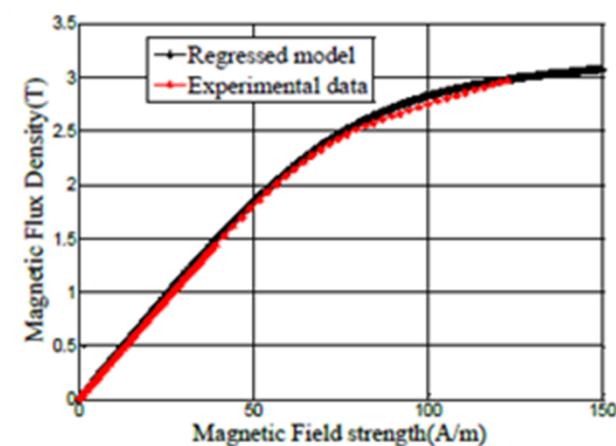
а)

Криві властивостей матеріалу деталі апроксимуються і вводяться у програму Flux2D для моделювання. Рівняння (17) і (18) є формулюваннями ізотропних м'яких магнітних матеріалів [17], графік яких представлено на рис.6,а. Змінюючи коефіцієнти μ_r , J_s і a , можна

отримати модель, яка добре узгоджується з емпіричною, як показано на рис.6,б.



а)



б)

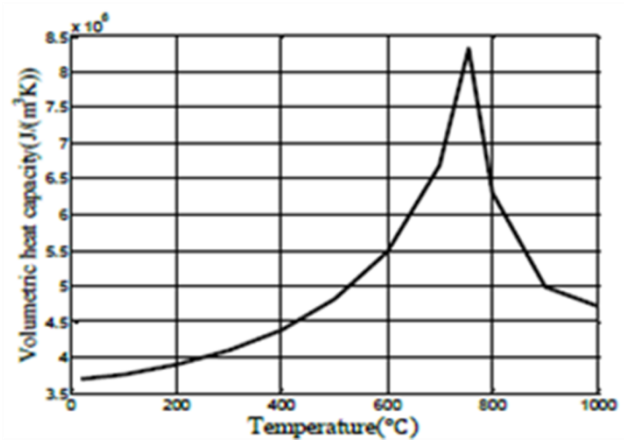
$$B(H) = \mu_0 H + J_s \frac{H_a + 1 - \sqrt{(H_a + 1)^2 - 4H_a(1-a)}}{2(1-a)}$$

$$H_a = \mu_0 H \frac{\mu_r - 1}{J_s}$$

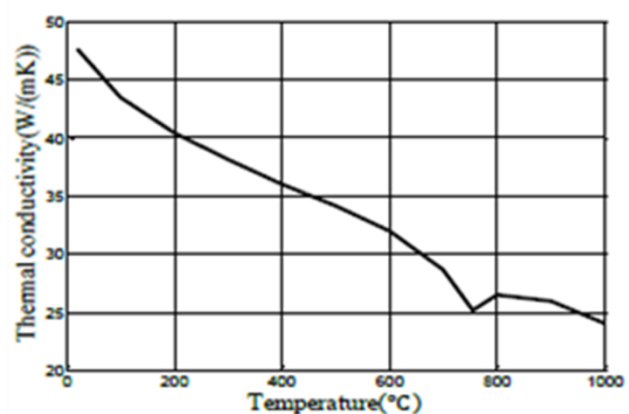
Рис. 6. В-Н крива моделі ізотропних магнітом'яких матеріалів:
 а - Регресійна модель у Flux2D [17] ;

б - Порівняння регресійної моделі з експериментальними даними

Об'ємна теплоємність C_p і теплопровідність λ залежать від температури T , але не залежать від напруженості магнітного поля. На рис.7,а і рис.7,б показані співвідношення $C_p - T$ і $\lambda - T$ відповідно, що показує, що C_p і λ матеріалу деталі сильно нелінійні [16].



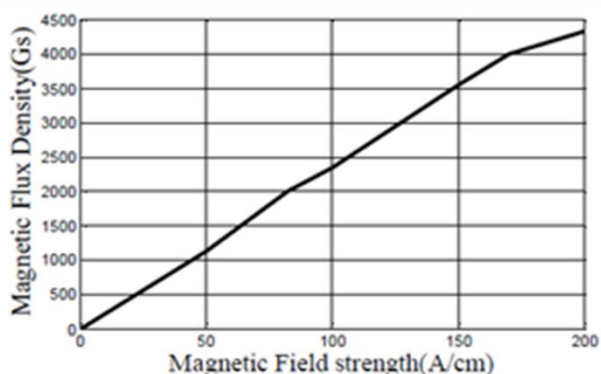
а)



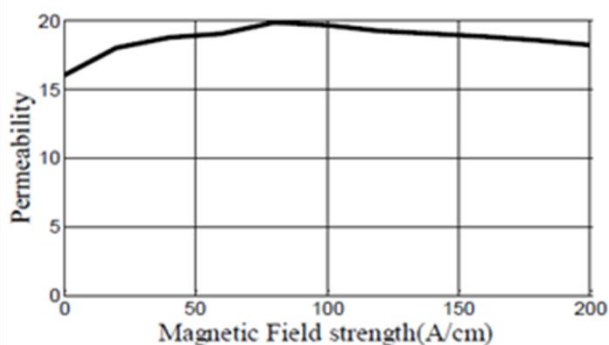
б)

Рис. 7. Об'ємна теплоємність і теплопровідність сталі 1045:
 а – теплоємність;
 б - теплопровідність.

Рис.8 ілюструє зміну проникності в залежності від напруженості магнітного поля матеріалу концентратора. І можна помітити, що проникність практично постійна в діапазоні зміни напруженості магнітного поля. Однак проникність все ще змінюється приблизно на 20% при збільшенні напруженості магнітного поля. Отже, криві проникності треба дискретизувати при розрахунку. Теоретично магнітна проникність також змінюється з підвищенням температури. Проте проникність концентратора не може змінюватися занадто сильно, оскільки він охолоджується безперервно водою, що проходить через котушку індуктивності.



а)



б)

Рис. 8. Проникність відносно напруженості магнітного поля [18] :

а - В-Н крива; б - проникність

Висновки

Індукційний нагрів з використанням концентратора дає переваги при обробці поверхонь. В роботі чисельним розрахунком досліджено індукційний нагрів на основі методу кінцевих елементів. Проведено обчислювальний процес для зв'язаної задачі електромагнітного нагріву. Магнітні і теплові характеристики матеріалів враховані в моделюванні з урахуванням їх залежності від температури і напруженості магнітного поля. За результатами роботи можна зробити наступний висновок:

- у порівнянні з традиційними методами індукційного нагріву індукційний нагрів з концентратором має більш високу ефективність і точність при ретельному контролі.

- розрахунок на основі моделі кінцевих елементів може ефективно прогнозувати розподіл температури. Тому модель кінцевих елементів може бути використана для подальшого аналізу і оптимізації нагрівання деталей будь якої складності.

Література

1. E.J. Davies, Conduction and Induction Heating, Peregrinus, London, 1990.

2. V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, Handbook of Induction Heating, Inductoheat, Inc, 2003.
3. Robert S. Ruffini, Robert T. Ruffini, Valentin S. Nemkov, Robert C. Goldstein, Advanced Design of Induction Processes and Work Coils for Heat Treating and Assembly in Automotive Industry, Proceedings of the 1999 SAE Southern Automotive Manufacturing Conference (P-351).
4. Valentin Nemkov, Robert Goldstein, Robert Ruffini, Magnetic Flux Controllers for Induction Heating Applications, Transactions of Materials and Heat Treatment Proceedings of the 14th IFHTSE congress, Vol.25, No.5, Oct.2004.
5. Hiroyuki Kagimoto, Daisuke Miyagi, Norio Takahashi, Naoki Uchida, Keiji Kawanaka, Effect of Temperature Dependence of Magnetic Properties on Heating Characteristics of Induction Heater, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 46, No. 8, August 2010.
6. G.Totten, M.Howes, T. Inoue, Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, 2002 ASM International.
7. C. Chaboudez, S. Clain, R. Glardon, D. Mari, J. Rappaz, M. Swierkosz, Numerical modeling in induction heating for axisymmetric geometries, IEEE Trans. Magn. 33 (1) (1997) 735-745.
8. F.Cajner, B.Smoljan, D.Landek, Journal of Materials Processing Technology 157-158 (2004) 55-60.
9. H.Shokrollahi, K. Janghorban, Journal of Materials Processing Technology 189 (2007) 1-12.
10. J. Yuan, J. Kang, Y. Rong, and R.D. Sisson, Jr, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 12(5) October, 2003:589-596.
11. Hiroki Kawaguchi, Masato Enokizono, Takashi Todaka, Journal of Materials Processing Technology 161 (2005) 193-198.
12. A.Zabett, S.H.Mohamadi Azghandi, Material and Design 36(2012) 415-420.
13. J. Rappaz, M. Swierkosz, Mathematical modeling and simulation of induction heating processes, Appl. Math. Comp. Sci. 6 (2) (1996) 207-221.
14. Coupard D, Palin-Luc T, Bristiel P, Ji V, Dumas C. Mater Sci Eng A 2009;487:328-9.
15. TAN Zhen, GUO Wen-guang, Thermal physical property of the engineering alloy M.. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991:52-53.

- | | |
|--|--|
| 16.FLUX 10 User's guide, volume 2:
Physical description. | Technologies and Design
Methods (internal report),
FLUXTROL Inc. |
| 17.Robert Ruffini, Advanced
Induction Heat Treating and
Surface Engineering: | |